

Perancangan dan Implementasi Sistem Pengaturan Kecepatan Motor Arus Searah Tanpa Sikat Menggunakan Metode PID-Robust

Ahmad Fachrudin Istiananda, Ir. Rusdhianto Effendie A.K. M.T., dan Andri Ashfahani S.T., M.T., M.Sc.

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

e-mail : ahmd.fachrudin@gmail.com, rusdhi@elect-eng.its.ac.id, dan andriashfahani@gmail.com.

Abstrak— BLDCM merupakan suatu jenis motor sinkron yang artinya medan magnet yang dihasilkan oleh stator dan medan magnet yang dihasilkan rotor berputar di frekuensi yang sama. Dalam BLDCM, salah satu hal yang sangat penting untuk dikontrol adalah kecepatan. Permasalahan yang diteliti dan dianalisis pada Tugas Akhir Perancangan dan Implementasi Sistem Pengaturan Kecepatan Motor Arus Searah Tanpa Sikat Menggunakan Metode PID-Robust adalah respon kecepatan BLDCM terhadap pembebanan yang berubah-ubah. Pengaturan kecepatan BLDCM dirancang menggunakan Kontroler Proporsional, Integral dan Derivatif (PID). Kontroler PID-Robust digunakan untuk membantu BLDC pada kondisi pembebanan untuk mempertahankan setpoint. Nilai parameter K_p , K_i , dan K_d sebesar 529,9, 0,00000373, dan 0,0624 didapat dari perhitungan robust performansi H_∞ dengan metode LMI (Linear Matrix Inequality). Setelah dilakukan simulasi, didapatkan bahwa respon plant dengan kontroler PID-Robust dapat mengikuti model referensi yang diinginkan dengan nilai rise time 7,7 untuk beban minimal, 3,75 untuk beban nominal, dan 5,9 untuk beban maksimal serta kuat/robust terhadap gangguan/disturbance.

Kata kunci : BLDC Motor, PID, Robust, Performansi H_∞

I. PENDAHULUAN

Pada zaman sekarang, teknologi semakin canggih, mulai dari peralatan mekanik, elektrik maupun perangkat lunaknya bersinergi untuk menghasilkan suatu produk ataupun peralatan baru. Motor listrik sebagai penggerak sangat berperan penting dalam dunia industri. Jenis penggerak yang sering dipakai di dunia industri adalah motor *brushless* DC. Motor ini memiliki beberapa kelebihan dibandingkan motor jenis yang lain seperti tingkat efektifitas serta kesederhanaan dari konstruksi motor. Dalam BLDC motor, kontroler memiliki peran penting dalam mempengaruhi performansi dalam aplikasinya di dunia industri. Hal ini menyebabkan timbulnya ketertarikan manusia dalam kontroler cerdas dan adaptif [1]. Proportional-integral-derivative (PID) banyak digunakan dalam aplikasi kontrol karena sifatnya yang simple dan efektif.

Perubahan parameter dari motor menyebabkan perubahan respon yang cukup signifikan. Metode yang umum

dilakukan adalah dengan melakukan penalaan parameter kontroler secara kontinyu. Hal ini tentu saja akan sangat merepotkan karena harus melakukan penalaan parameter kontroler setiap terjadi perubahan beban. Untuk itu diperlukan suatu kontroler yang memiliki sifat kokoh terhadap gangguan maupun perubahan parameter[1].

Meskipun penggunaan kontrol PID mempunyai sejarah yang lama, tiga parameter gain, proporsional gain (K_p), integral gain (K_i), dan derivatif gain (K_d), biasanya bernilai tetap. Kelemahan kontroler PID adalah kapabilitasnya rendah dalam menghadapi ketidakpastian sistem, variasi parameter, dan gangguan dari luar. Sehingga *robustness* mendapatkan perhatian lebih[2].

Tujuan utama dari perancangan sistem kontrol adalah mampu menstabilkan sistem dengan performansi tertentu. Dalam sistem nyata, ketidakpastian parameter maupun gangguan dari luar dapat mengganggu kestabilan sistem, sehingga kontroler yang dirancang harus *robust* terhadap ketidakpastian serta gangguan tersebut. Sistem dikatakan memiliki performansi *robust* apabila sistem mampu menjaga kestabilannya meskipun terdapat ketidakpastian parameter serta gangguan dari luar[2]. Dalam Tugas Akhir ini kontroler dirancang agar memiliki performansi H_∞ .

Salah satu metode kontrol *robust* yang sering digunakan adalah kontrol *robust* H_∞ . Pada H_∞ , kontroler didesain untuk meminimalkan pengaruh terburuk keluaran performansi ketika terdapat gangguan yang diberikan pada sistem. Pengaruh terburuk gangguan terhadap keluaran performansi dapat diketahui dengan menghitung ∞ -norm dari fungsi alih sistem. ∞ -norm dari suatu fungsi alih didefinisikan sebagai

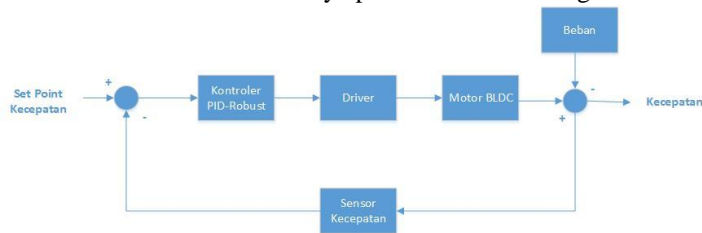
$$\|G(s)\|_\infty = \sup_{\omega} |G(j\omega)| \quad (1)$$

Dari Persamaan (1), ∞ -norm dari suatu fungsi alih adalah nilai maksimal dari plot *magnitude* Bode. Jika $G(s)$ menyatakan fungsi alih keluaran performansi terhadap gangguan, dan ∞ -norm dari $G(s)$ bernilai kecil, maka dapat dikatakan bahwa gangguan yang diberikan teredam sesuai besarnya ∞ -norm[2].

II. PERANCANGAN SISTEM

Proses perancangan sistem pada penelitian ini sesuai dengan diagram blok Gambar 1. *Set point* masuk pada Kontroler PID-Robust. Komunikasi dari plant motor BLDC dengan kontroler menggunakan Arduino Uno. Aktuator berupa motor BLDC. *Plant* yang dibuat merupakan *plant* motor BLDC yang terdiri dari beberapa komponen penyusun yang dirangkai membentuk suatu *plant* motor BLDC untuk melaksanakan suatu objektif tertentu sesuai dengan tujuan dilaksanakannya Tugas Akhir. *Plant* motor BLDC sendiri terdiri dari komponen utama yaitu motor arus searah tanpa sikat (BLDC Motor) yang diambil dari AC Inverter merek Daikin, rem elektromagnetik, serta sensor arus. Rem elektromagnetik bekerja untuk memberikan efek pembebanan pada kinerja motor. Pembebanan motor merupakan beban yang akan diterima motor pada saat motor menggerakkan piringan aluminium.

Selain perangkat keras berupa motor BLDC dan rem elektromagnetik, ditambahkan pula beberapa komponen pendukung, seperti driver untuk motor BLDC dan driver untuk rem elektromagnetik. Selain itu, dilengkapi pula sensor arus untuk mengetahui besaran arus yang diberikan pada komponen rem elektromagnetik sebagai efek pembebanan pada motor BLDC. Mikrokontroler Arduino juga akan dipakai pada sistem ini sebagai perantara antara sensor-sensor dan driver dengan komputer. Serta rangkaian pengatur PWM (Pulse Width Modulation) yang digunakan untuk mengatur besarnya sinyal kontrol yang diberikan pada rem untuk membantu besarnya pembebanan rem magnetik.



Gambar 1 Diagram Blok Perancangan Sistem

A. Motor Brushless DC [5]

Motor Brushless DC (BLDC) adalah motor sinkron dengan magnet permanen pada rotor dan kumparan jangkar pada stator. Keuntungan paling jelas dari konfigurasi tanpa sikat adalah penghilangan sikat, yang menghilangkan pemeliharaan sikat dan bunga api. Penggunaan kumparan jangkar pada stator membantu konduksi panas pada kumparan. Karena tidak ada kumparan pada rotor, kerugian listrik dalam rotor menjadi minimal. Motor BLDC lebih disukai dibandingkan dengan motor induksi untuk daerah daya sebagian-sebagian. Motor BLDC memiliki efisiensi yang dan faktor daya yang lebih baik dan oleh karena itu, daya keluaran lebih besar untuk kerangka yang sama, karena penguatan medan dipengaruhi oleh magnet permanen dan tidak harus disuplai oleh arus jangkar. Keuntungan-keuntungan yang didapat dari motor BLDC disertai dengan peningkatan kompleksitas di kontroler elektronik dan

perlunya penginderaan posisi poros. Eksitasi magnet permanen (PM) lebih layak untuk motor kecil, biasanya di bawah 20 kW. Untuk motor yang lebih besar, biaya dan berat magnet menjadi terlalu tinggi, dan itu akan membuat lebih masuk akal untuk memilih eksitasi dengan elektromagnet.

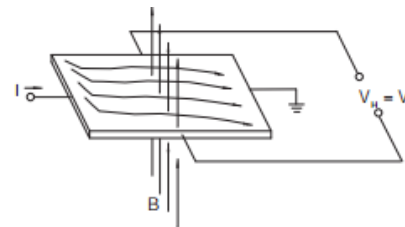
Namun, dengan pengembangan bahan magnet permanen medan tinggi, motor PM dengan kapasitas beberapa megawatt telah dibangun. Meskipun motor BLDC memakan biaya lebih dari motor DC dengan sikat, hal ini akan sepadan seiring dengan banyaknya waktu dan uang yang dihabiskan motor DC dengan sikat jika sikat aus [5]. Rancangan fisik *hardware* bisa dilihat pada

B. Hall Effect Sensor [4]

Jika sebuah konduktor berarus diletakkan di dalam medan magnet, akan muncul tegangan yang tegak lurus dengan arus dan medan magnet. Prinsip ini disebut dengan efek Hall.

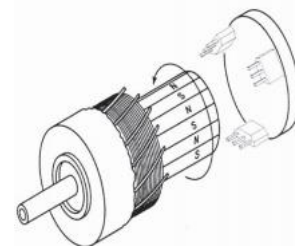
Jika medan magnet tegak lurus dengan arus seperti ditunjukkan pada gambar 3, akan muncul gaya Lorentz yang bekerja pada elektron-elektron konduktor. Gaya ini akan mengganggu distribusi arus, menyebabkan perbedaan potensial (tegangan). Tegangan ini adalah tegangan Hall (V_H). Hubungan dari besar tegangan Hall dengan arus dan medan magnet ditunjukkan pada persamaan 2.

$$V_H \propto I \times B \quad (2)$$



Gambar 2 Prinsip efek hall

Pada motor BLDC, komutasi dilakukan secara elektrik. Gambar 3 menggambarkan bagaimana komutasi dapat dilakukan menggunakan 3 buah sensor. Sensor mendeteksi posisi angular poros dan menyampaikan informasi tersebut ke sebuah rangkaian logika. Rangkaian logika tersebut kemudian mengolah informasi posisi rotor untuk mengatur switch dari rangkaian driver motor.



Gambar 3 Peletakkan sensor posisi motor BLDC.

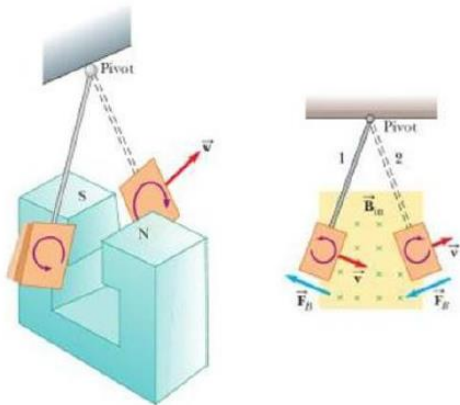
C. Rem Elektromagnetik [6]

Rem adalah suatu alat yang digunakan untuk melakukan aksi deselerasi yang akan menurunkan kecepatan dalam

selang waktu yang ditentukan. Tipe rem yang umum digunakan adalah rem yang menggunakan gaya gesek untuk memberikan gaya lawan terhadap gaya gerak. Namun pada sistem pengereman elektromagnetik menggunakan gaya elektromagnetik untuk memperlambat suatu gerakan, yang umumnya adalah gerakan poros.

Sebuah piringan dengan bahan logam non-feromagnetik terpasang dengan poros yang berputar. Piringan tersebut diapit oleh sisi *rotor* berupa sistem lilitan elektromagnetik yang dapat membangkitkan medan magnet dari aliran listrik. Arus listrik menimbulkan medan magnet pada lilitan dan logam piringan yang memotong medan magnet tersebut akan menimbulkan arus eddy pada piringan itu sendiri.

Arus eddy ini akan menimbulkan medan magnet yang arahnya berlawanan dengan medan magnet sebelumnya, sehingga menghambat gerakan putar dari poros tersebut. Rem elektromagnetik akan optimal untuk memberikan penurunan kecepatan, bukan untuk menghentikan gerak suatu objek. Sehingga rem ini sering diaplikasikan untuk sistem pengereman pada roller coaster, kereta api dan juga digunakan pada alat dinamometer untuk pengukuran torsi suatu mesin.



Gambar 4 Prinsip Arus Eddy Pada Logam yang Bergerak

D. Arduino [7]

Arduino adalah pengendali mikro single-board yang bersifat open-source, diturunkan dari wiring platform, dirancang untuk memudahkan penggunaan elektronik dalam berbagai bidang. Hardwarenya memiliki prosesor Atmel AVR dan softwarenya memiliki bahasa pemrograman sendiri. Saat ini Arduino sangat populer di seluruh dunia. Banyak pemula yang belajar mengenal robotika dan elektronika lewat Arduino karena mudah dipelajari. Bahasa yang dipakai dalam Arduino bukan *assembler* yang relatif sulit, tetapi bahasa C yang disederhanakan dengan bantuan pustaka-pustaka (*libraries*) Arduino. Arduino juga menyederhanakan proses bekerja dengan mikrokontroler.

Arduino Uno adalah *board* mikrokontroler berbasis Atmega328. Alat ini mempunyai 14 pin *input/output* digital dan 6 diantaranya dapat digunakan sebagai *output* PWM, 6 *input* analog, resonator keramik 19MHz, koneksi USB, soket listrik, ICSP *header*, dan tombol reset. Gambar 3 merupakan tampilan fisik dari Arduino Uno. Dengan kabel USB alat ini mudah dihubungkan ke komputer dan dapat

diaktifkan dengan baterai atau adaptor AC ke DC. Tabel 1 menjelaskan mengenai spesifikasi Arduino Uno:

Tabel 1.
Spesifikasi Arduino Uno

Mikrokontroler	Atmega328
Tegangan operasi	5V
Tegangan (direkomendasikan)	<i>input</i> 7-12V
Tegangan <i>input</i> (batasan)	6-20V
Pin <i>input/output</i> digital	14 (6 diantaranya <i>output</i> PWM)
Pin <i>input</i> analog	6
Arus DC tiap pin I/O	40mA
Arus DC untuk pin 3,3 V	50mA



Gambar 5. Tampilan Fisik Arduino Uno

E. Identifikasi Plant

Fungsi transfer plant didapatkan dengan melakukan identifikasi pada plant. Fungsi transfer digunakan untuk menggantikan plant pada simulasi dengan persamaan matematika. Identifikasi yang dilakukan dengan

memberikan sinyal PRBS (*Pseudo Random Binary Sequence*) pada input motor dan mengambil output berupa kecepatan motor. Dari data input dan output motor itulah akan didapatkan model matematis plant. Metode yang digunakan untuk mendapatkan model matematis plant ini yaitu dengan menggunakan *System Identification Toolbox Matlab*. Tahap ini dilakukan sehingga didapatkan fungsi transfer plant untuk beban minimal, nominal, dan maksimal. Fungsi transfer plant dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2.
Fungsi Transfer Plant

Beban	Tegangan <i>input</i> beban	Fungsi Alih	Fit to Estimasi on	MSE
Minimal	16 Volt	$428,8s + 1279$ $s^2 + 2,351s + 0,7318$	78,9%	376
Nominal	20 Volt	$536,2s + 1969$ $s^2 + 3,461s + 1,185$	78,12%	346
Maksima l	24 Volt	$460,3s + 1396$ $s^2 + 2,47s + 0,8689$	79,55%	271

F. Desain Kontroler

Pada hasil identifikasi, didapatkan fungsi transfer plant pada beban nominal sebagai berikut:

$$\frac{122,2386}{s^2 + 28,9879s + 134,5795}$$

Dari Persamaan (5) yang merupakan model plant dari beban nominal, akan didesain kontroler PID-Robust untuk mengendalikan model tersebut. Setelah fungsi alih dari sistem telah didapatkan, langkah selanjutnya adalah merancang kontroler untuk pengaturan kecepatan motor. Kontroler digunakan untuk membuat *plant* mengikuti model referensi yang diinginkan sekalipun motor BLDC diberi beban. Pertama-tama, dirumuskan dahulu *gain state-feedback* yang mampu menjamin kestabilan sistem lup tertutup berdasarkan kriteria Lyapunov. Selain mampu menjamin kestabilan sistem, performansi H_∞ juga disertakan dalam perumusan pertidaksamaan Lyapunov yang kemudian akan diubah ke dalam bentuk LMI.

Sebelum merancang kontroler PID-Robust, diperlukan model referensi yang diinginkan. Koefisien numerator dan denominator fungsi penghantar persamaan (3), akan dimisalkan menjadi variabel tetap agar lebih mudah dalam mendesain kontroler. Sehingga fungsi penghantar plant akan menjadi :

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{s^2 + As + B} \quad (4)$$

dimana :

$$K = 1969$$

$$A = 3,461$$

$$B = 1,185$$

Kontroler PID-Robust merupakan kontroler berbasis model. Artinya, diperlukan sebuah pemodelan fungsi alih yang baik agar kontroler yang telah didesain dapat bekerja secara optimal. Fungsi alih yang digunakan merupakan fungsi alih motor BLDC pada pembebanan maksimal. Fungsi alih ini tidak bisa langsung digunakan untuk merancang kontroler PID-Robust, melainkan harus diubah terlebih dahulu ke dalam bentuk *state-space*. Pada pembebanan maksimal, representasi fungsi alih (yang bernilai RMSE paling kecil adalah sebagai berikut:

$$\frac{\Omega(s)}{Ea(s)} = \frac{K}{s^2 + as + b}$$

Persamaan beda dari fungsi alih ini menjadi model matematika input Ea output Ω

$$\begin{aligned} \ddot{\Omega} + a\dot{\Omega} + b\Omega &= KEa \\ \dot{\Omega} &= -a\dot{\Omega} - b\Omega + KEa \end{aligned} \quad (6)$$

Misal state $x_1 = \dot{\Omega}$; $x_2 = \Omega$; dan $x_3 = \int \Omega$

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \ddot{\Omega} = -a\dot{\Omega} - b\Omega + KEa \\ \dot{x}_2 &= \dot{\Omega} = x_1 \\ \dot{x}_3 &= \Omega = x_2 \end{aligned} \quad (7)$$

Bentuk *state-space* yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah bentuk *controllable canonical form* [17]. Bentuk *state-space* untuk orde 2 tersebut mempunyai struktur sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a & -b & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} Ea$$

(8)

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$$

Berdasarkan bentuk model *state-space* dari Persamaan 3.1 dapat kita simpulkan bahwa gain dari K_1 , K_2 dan K_3 sebagai berikut:

$$K = [K_1 \quad K_2 \quad K_3] \quad (9)$$

dimana

$$\begin{aligned} K_1 &= K_d \\ K_2 &= K_p \\ K_3 &= K_i \end{aligned} \quad (10)$$

Persamaan (9) dan (10) merupakan gain yang didapat dari parameter oleh persamaan diferensial untuk *Robustness* dengan performansi H_∞ menggunakan penyelesaian dengan metode LMI (*Linear Matrix Inequalities*), sinyal kontrol PID-Robust yang nantinya akan didesain pada diagram blok program kontroler dengan menggunakan MATLAB.

Model motor dapat di ketahui dengan cara analisa persamaan beda yang digunakan secara keseluruhan, selanjutnya dicari analisa kestabilan *Lyapunov*, yang di dapat dengan persamaan berikut

Jadi agar sistem terjamin kestabilannya, harus terdapat matriks simetris P yang memenuhi LMI:

$$1) P > 0 \quad (11)$$

$$2) \begin{bmatrix} A_i^T P + P A_i - K_j^T B_{u,i}^T P - P B_{u,i} K_j & P B_{w,i} \\ B_{w,i}^T P & 0 \end{bmatrix} < 0 \quad (12)$$

Jika Pertidaksamaan menunjukkan L_2 -Gain sistem, dan terdapat fungsi Lyapunov $(x(t)) = x(t)^T P x(t)$, $P > 0$, dan $\gamma \geq 0$ sehingga untuk semua t ,

$$\dot{V}(x(t) + z_1(t)^T z_1(t) - \gamma^2 w(t)^T w(t) < 0 ; \forall t \geq 0 \quad (13)$$

maka L_2 -Gain sistem memiliki nilai kurang dari γ [11].

Dari Pertidaksamaan (3.25) komponen $\dot{V}(x(t))$ memiliki bentuk seperti pada Persamaan (3.23), sedangkan komponen $z_1(t)^T z_1(t)$ dapat dijabarkan dari (3.20) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} z_1(t)^T z_1(t) &= [C_{z1,i} x(t)]^T [C_{z1,i} x(t)] \\ z_1(t)^T z_1(t) &= x(t)^T C_{z1,i} x(t)^T C_{z1,i} x(t)^T \end{aligned} \quad (14)$$

$$z_1(t)^T z_1(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} C_{z1,i}^T C_{z1,i} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix}$$

Selanjutnya, komponen $\gamma^2 w(t)^T w(t)$ dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$\gamma^2 w(t)^T w(t) = [w(t)]^T [\gamma^2 I] [w(t)]$$

$$\gamma^2 w(t)^T w(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \gamma^2 I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix} \quad (15)$$

Substitusi (3.16), (3.22), dan (3.23) pada Pertidaksamaan (3.20) akan didapat

$$\dot{V}(x(t) + z_1(t)^T z_1(t) - \gamma^2 w(t)^T w(t) < 0 \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} A_i^T P + P A_i - K_j^T B_{u,i}^T P - P B_{u,i} K_j & P B_{w,i} \\ B_{w,i}^T P & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} C_{z1,i}^T C_{z1,i} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \gamma^2 I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix} < 0 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix}^T \left\{ \begin{bmatrix} A_i^T P + P A_i - K_j^T B_{w,i}^T P - P B_{w,i} K_j & P B_{w,i} \\ B_{w,i}^T P & \gamma^2 I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{z1,i}^T \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{z1,i} & 0 \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix} < 0 \quad (17)$$

Dari Pertidaksamaan, akan didapat LMI:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} A_i^T P + P A_i - K_j^T B_{u,i}^T P - P B_{u,i} K_j & P B_{w,i} \\ B_{w,i}^T P & \gamma^2 I \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} C_{z1,i}^T \\ 0 \end{bmatrix} [I] [C_{z1,i} \quad 0] < 0 \end{aligned} \quad (18)$$

Penerapan *Schur Complement* pada LMI (18) dan *pre-multiplying* dan *post-multiplying* LMI (18) dengan matriks P^{-1} akan menghasilkan LMI (19).

$$\begin{bmatrix} A_i^T Q + Q A_i - K_j^T B_{u,i}^T P - P B_{u,i} K_j & B_{w,i} & Q C_{z1,i}^T \\ B_{w,i}^T & -\gamma^2 I & 0 \\ C_{z1,i} Q & 0 & -I \end{bmatrix} \quad (19)$$

dengan

$$Q = P^{-1} \quad \text{dan} \quad Y_j = K_j P^{-1} \quad (20)$$

Jika terdapat matriks simetris $Q > 0$ yang memenuhi LMI (20), maka sistem (3.13) dikatakan stabil dengan tingkat pelemahan gangguan $w(t)$ terhadap keluaran $z_1(t)$ kurang dari γ .

Untuk menyelesaikan LMI (20), dapat digunakan LMI *Toolbox* dari MATLAB. Nilai parameter γ divariasi antara 1 dan 0 dan didapat hasil terbaik yaitu ketika $\gamma = 0.5$. Adapun hasil matriks P , Y yang didapat adalah

$$P = \begin{bmatrix} 7,69 * 10^{-9} & 9,57 * 10^{-7} & 6,74 * 10^{-15} \\ 9,57 * 10^{-7} & 0,0080 & 5,63 * 10^{-11} \\ 6,74 * 10^{-15} & 5,63 * 10^{-11} & 7,45 * 10^{-9} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$Y = 10^5 * [-1,5197 \quad 0,6629 \quad 0,000000163] \quad (22)$$

Dari Persamaan dapat dihitung *gain state-feedback* K untuk parameter gain dari K_p , K_i dan K_d pada PID-Robust, yaitu

$$K = [0,0624 \quad 529,9 \quad 0,00000373] \quad (23)$$

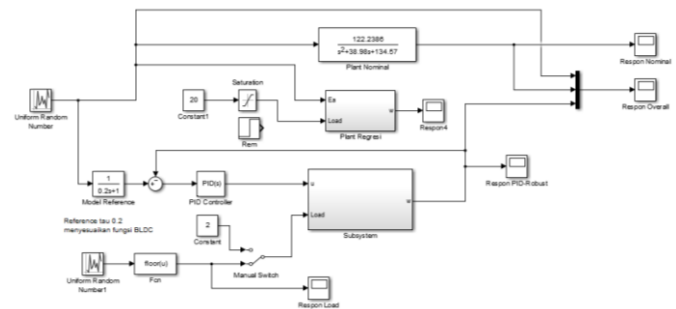
Setelah diketahui nilai pole-pole dari model maka dapat diketahui nilai K_p , K_i , dan K_d sebesar 150, 0.0001, dan 0.0236.

III. IMPLEMENTASI DAN ANALISIS DATA

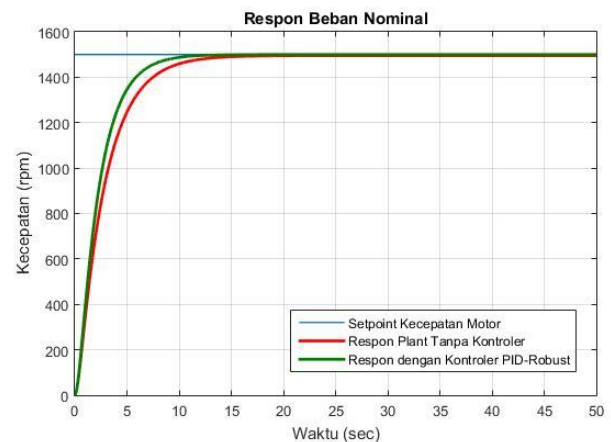
A. Simulasi

Pemodelan dilakukan dengan metode seperti yang dijelaskan pada bab sebelumnya. Untuk simulasi kontroler

digunakan *software* MATLAB. Gambar 7 menunjukkan diagram blok simulasi kontroler dengan menggunakan metode *PID-Robust*.

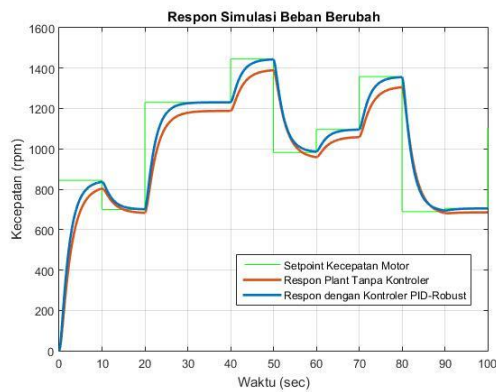


Gambar 5 Diagram Blok Simulasi Kontroler



Gambar 6 Hasil Simulasi Respon Model dengan Beban Nominal

Gambar 7, menunjukkan perbandingan antara respon asli dengan respon hasil pemodelan pada keadaan beban nominal, maksimal, dan minimal dengan menggunakan *software* MATLAB. Terlihat bahwa respon pemodelan plant dengan menggunakan PID-*Robust* berimpit dengan respon dari model yang diinginkan. Dari Gambar tersebut terlihat bahwa pemodelan plant membutuhkan waktu steady state yang lebih lama dari respon plant yang sebenarnya dikarenakan pemodelan plant mengikuti model yang diinginkan. Waktu untuk mencapai *steady state* pada respon asli plant sebesar 0.7 detik sedangkan saat diberi kontroler PID-*Robust* untuk mengikuti steady state pada model yang diinginkan sebesar 6 detik. Kecepatan dari motor dalam bentuk persentase sehingga perlu dikalikan dengan kecepatan maksimal sebesar 1535 rpm.



Gambar 7 Hasil Simulasi Respon Model dengan Beban Berubah

Indeks performansi dari respon *step* dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3.
Indeks Performansi Plant saat Simulasi

Indeks Performansi	PID-Robust		
	Beban Minimal	Beban Nominal	Beban Maksimal
T_R (detik)	5,053	5,05	5,049
T_S (detik)	10,431	10,443	10,439
RMSE	0	0	0
Overshoot(%Mp)	0	0	0
Error Steady State(Ess)	0	0	0

B. Implementasi

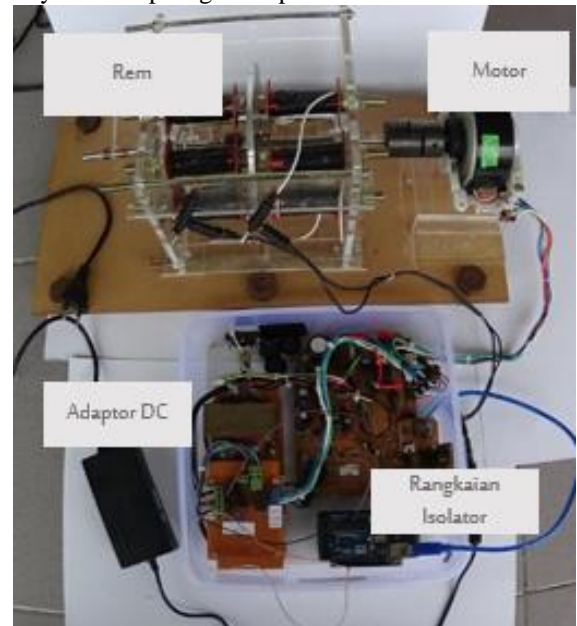
Pada tahapan ini kontroler yang telah dibuat dicoba dijalankan pada plant *real* motor BLDC P-1. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan respon *step* pada saat plant diberi beban minimal, nominal, dan maksimal.

Pada *plant* ini sebagian besar bahan dasar yang dipakai untuk dudukan terbuat dari akrilik. Pada *plant* ini terdapat dua buah PCB yang diantaranya rangkaian *board* Daikin dan rangkaian isolasi. Setelah itu terdapat 8 buah lilitan kawat yang berfungsi sebagai rem magnetik. Selain itu terdapat 1 buah piringan yang satu terbuat dari aluminium yang berfungsi sebagai beban pada poros.

Motor BLDC yang digunakan ialah motor BLDC yang biasa digunakan pada perangkat *Air Conditioner* (AC/Pendingin Ruangan). Motor BLDC tersebut merupakan hasil pabrikan dari produsen keperluan pendingin ruangan yang dipergunakan pada *plant* ini yaitu Daikin D43F. Motor jenis memiliki tegangan nominal 307 VDC. Dilihat dari struktur fisik motor yang cukup lebar, biasanya motor jenis ini memiliki kecepatan putar yang cukup rendah tetapi memiliki torsi yang lebih besar.

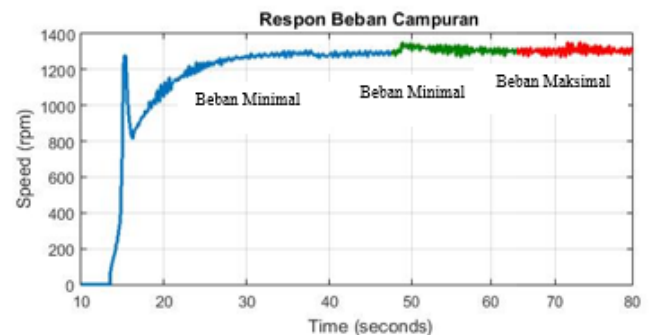
Konstruksi rem magnetik adalah baut yang memiliki diameter 1 cm. lalu baut tersebut dililit sebanyak 400 lilitan agar didapatkan medan magnet yang cukup kuat untuk membebani motor BLDC. Pada gambar tersebut juga terlihat ada piringan diantara dua baut yang terbuat dari aluminium setebal 5 mm. diameter dari pringan ini adalah 15 cm. piringan terpasang pada sebuah poros yang terpasang

dengan kopel yang terhubung dengan motor. Poros ini juga ikut menyebabkan piringan berputar.



Gambar 8 Plant Motor BLDC P-1

Grafik respon transien *output plant* dengan PID-Robust pada kondisi beban minimal, nominal, dan maksimal. Dari gambar dapat ditarik kesimpulan bahwa pada saat diberi beban minimal, nominal, maupun maksimal, motor dapat mengikuti respon model referensi yang diinginkan.



Gambar 9 Step Respon Sistem Beban Berubah

Gambar 10 merupakan hasil respon sistem ketika motor diberi beban minimal, lalu setelah *steady* beban diubah menjadi beban nominal, dan setelah *steady* diubah menjadi beban maksimal.

IV. KESIMPULAN

Dalam pengerjaan penelitian ini dapat disimpulkan bahwa kontroler PID-Robust ini dapat digunakan untuk memperlambat *rise time* dan juga memperkecil *overshoot* pada saat dilakukan simulasi. Pada simulasi kontroler beban minimal, nominal, dan maksimal didapatkan respon dengan spesifikasi yang diinginkan. Pengaturan kecepatan menggunakan PID-Robust menghasilkan respon sistem yang dapat mengikuti respon model referensi yang diharapkan. Pada kecepatan dibawah 1000 rpm, sensor kecepatan tidak dapat membaca data dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Guifang CAI, Kun QIAN, dkk “*Robust PID Controller in Brushless DC Motor Application*”, IEEE International Conference on Control and Automation, Guangzhou, CHINA, 2007.
- [2] Kazuo Tanaka, Takayuki Ikeda, dan Hua O. Wang, "Robust Stabilization of a Class of Uncertain Nonlinear Systems via Fuzzy Control: Quadratic Stabilizability, H_∞ Control Theory, and Linear Matrix Inequalities," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 4, no. 1, February 1996.
- [3] Katsuhiko Ogata, *Modern Control Engineering*, 3rd ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1997.
- [4] S. G. Cao, N. W. Rees, dan G. Feng, "H ∞ control of uncertain fuzzy continuous-time systems," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 115, pp. 171-190, 2000.
- [5] _____, “*Brushless DC Motor Engineering*”, <URL: http://www.nmbtc.com/brushless-dc-motors/engineering/brushless_dc_motors_engineering/>, 2007.
- [6] Putra, Guntur Shadiea, “*Perancangan Kontrol Kecepatan Motor Arus Searah Tanpa Sikat Menggunakan Sliding Mode Berbasis PID*”, Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro ITS Surabaya, 2015.
- [7] _____, “*Arduino*”, <URL: <http://arduino.cc/>>, Mei, 2015.